

燃油温度对船用柴油机喷雾及燃烧特性影响的仿真研究

何郭靖, 张文正, 平 涛, 闫 萍, 孙 强

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 以某型船用柴油机为研究对象, 通过对不同燃油温度下喷嘴内部的流动仿真分析, 对喷嘴内部的流动和空穴现象进行了研究, 得到合理的喷孔出口处油滴的初始状态; 通过喷雾和缸内燃烧的耦合计算, 分析不同的燃油温度对柴油机燃烧及排放特性的影响规律。研究结果表明: 燃油进机温度直接影响燃油喷雾、破碎、蒸发及燃烧过程, 对 NO_x 排放影响更为明显; 燃油进机温度须作为柴油机燃烧系统开发试验时的试验基准之一。

关键词: 船用柴油机; 燃油温度; CFD; 燃烧; 喷雾

中图分类号: TK421⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2014)02-0009-05

Simulation Research of the Influence of Different Fuel Temperatures on Marine Diesel Engine's Spray and Combustion Characteristics

He Guojing, Zhang Wenzheng, Ping Tao, Yan Ping, Sun Qiang

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: Based on a marine diesel engine, through the simulation analysis on nozzle inner flow under different fuel temperatures, research was carried out on nozzle inner flow and nozzle cavitation phenomenon, the reasonable initial condition of the oil droplets was obtained. By calculating the spray coupling with cylinder combustion, the influence of different fuel temperatures on the combustion and emission of the diesel was analyzed. It was found that fuel temperature directly affected the fuel spray, broken, evaporation and combustion process, and the influence on NO_x emission was more apparent. Fuel temperature should be taken as a test criterion during the development of the diesel engine combustion system.

Keywords: marine diesel engine; fuel temperature; CFD; combustion; spray

0 引 言

船舶行业的排放法规日益严格, 国际海事组织的 IMO II 标准已于 2011 年初生效, IMO III 标准将于 2016 年实施。这意味着柴油机的 NO_x 排放将有大幅度的降低, 针对这一排放法规, 多种措施都已应用于柴油机的设计, 例如机内措施, 包括米勒定时, 加湿技术等; 后处理包括 SCR 技术等。

这些技术的应用都需要一个较好的燃烧过程

作基础, 而柴油机燃烧是一个包含两相流、湍流、传热以及喷雾破碎、蒸发和污染物形成等现象的复杂过程。这个过程各个因素对发动机的动力性、经济性和排放性都起着不同的作用和影响。其中燃油温度对柴油机的燃烧及排放都有着一定的影响, 在不同的状态下控制不同的燃油温度, 使柴油机的经济性、排放性都达到最优状态。

本文针对船用中速柴油机, 通过数值模拟仿真分析, 开展不同燃油温度下喷嘴内部流动分析, 对

喷嘴内部的流动和空穴现象进行研究,得到合理的喷孔出口处油滴的初始状态;通过喷雾流动仿真和缸内燃烧的耦合计算,得到不同燃油温度下的喷雾状态和火焰传播情况,分析不同的燃油温度对柴油机燃烧及排放特性的影响规律。

1 计算模型的建立及验证

研究对象是某型船用中速柴油机,其发动机原始参数如表 1。

表 1 发动机基本参数

转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 000
气缸直径/mm	210
活塞行程/mm	320
连杆长度/mm	680
压缩比	17
进气门关闭时刻/ $^{\circ}\text{CA}$	512
排气门打开时刻/ $^{\circ}\text{CA}$	828
标定功率/标定转速/ $\text{kW}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 320/1 000

1.1 计算网格

喷孔长度为 2.4 mm, 喷孔直径为 0.42 mm, 针阀升程为 0 ~ 0.4 mm。缸内燃烧计算工况为高压阶段, 从进气阀关(512 $^{\circ}\text{CA}$)到排气阀开(828 $^{\circ}\text{CA}$), 整个过程包括了压缩、燃烧、膨胀过程。

本文采用 AVL FIRE 软件的动网格技术对喷油器进行网格划分, 采用分块耦合方法生成三维结构化网格, 对喷孔处网格进行局部加密。缸内网格应用 ESE 直接生成。由于气缸和喷油器是中心对称的, 为节约计算时间, 根据喷孔数目, 选取 1/8 的喷油器和气缸进行建模, 具体网格如图 1、2 所示。

1.2 计算边界条件和初始条件

采用发动机性能分析软件 AVL Boost 和燃油喷射模拟软件 Hydsim 为仿真分析提供初始条件和边界条件, 计算模型如图 3、4 所示。

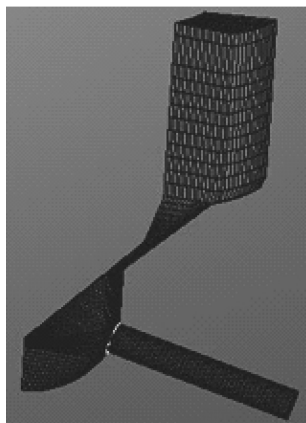


图 1 喷油器计算网格模型



图 2 燃烧室计算网格模型

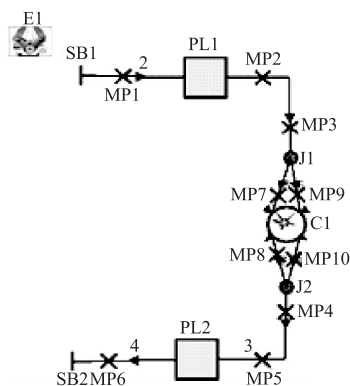


图 3 柴油机工作过程计算模型

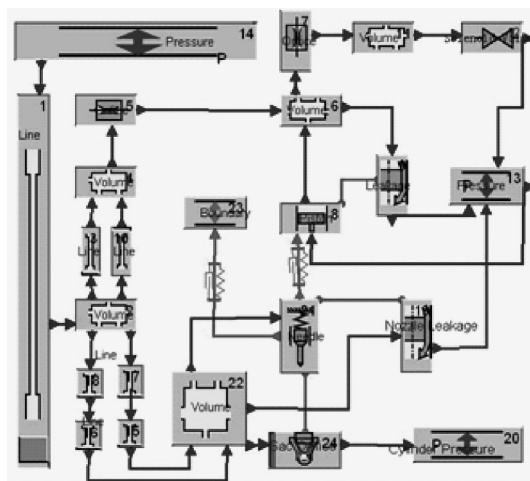


图 4 柴油机燃油系统仿真模型

喷油器计算时入口和出口均设为压力边界条件, 喷油时刻的缸内压力由试验数据得到 $p_{\text{out}} = 16 \text{ MPa}$; 喷油器壁面温度为 323 K, 其表面流速无滑移, 近壁区采用标准壁面函数法处理; 截取喷油器 1/8 作为计算域所产生的两个截面为对称边界条件, 通过该边界无压力降。数值计算的流体为柴油, 在温度为 297 K 时, 其液态密度为 $830 (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$, 动力黏度为 $0.00214 (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2})$ 。

壁面边界条件给定经验值, 壁面温度设置如表 2。

表 2 壁面边界条件

边界范围	设定值/K	边界面类型
气缸盖底面温度	573	固定壁面
气缸套温度	506	固定壁面
活塞表面温度	653	移动壁面

1.3 计算模型

内燃机缸内多维数值模拟的实质是对可压缩黏性流体的 N-S 方程进行数值求解, 满足质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程及理想气体状态方程。本文中对柴油机缸内的气体流动模拟采用 $k-\epsilon-f$ 模型, 与标准的 $k-\epsilon$ 模型相比, 其计算精度及稳定性均有所提高。

燃油喷射模块中的破碎子模型采用 Wave 模型, 撞壁子模型采用 Walljet1 模型, 蒸发子模型采用 Dukowicz, 考虑湍流扩散子模型, 未考虑碰撞聚合子模型。

燃烧模型采用扩展三区拟序火焰模型(Extended Coherent Flame Model-3Zone, ECFM-3Z), 其基本思想认为: 燃烧火焰由许多微小的褶皱小火焰构成, 化学反应发生在这层很薄的火焰面上。拟序火焰面模型将化学相和湍流相分别进行处理, 考虑了化学机理和湍流的相互影响。众所周知, 柴油机的燃烧既有预混燃烧又有扩散燃烧, 并以扩散燃烧为主, 因此拟序火焰面模型使用一个湍流混合模型来描述燃油蒸汽和空气之间的混合, 从物理意义上更准确。

排放模型采用 Zeldovich 模型。

1.4 计算模型的验证

为验证计算模型的准确性, 在标定转速 $1\,000\ (\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ 的工况下, 将计算与试验得到的缸内燃烧缸压曲线进行对比。图 5 为经过标定的 100% 工况计算缸压曲线与实测缸压曲线的对比。从结果可以看出, 计算结果与实测结果基本吻合, 计算误差小于 5%, 即计算模型可以反映实际缸内燃烧发展过程。

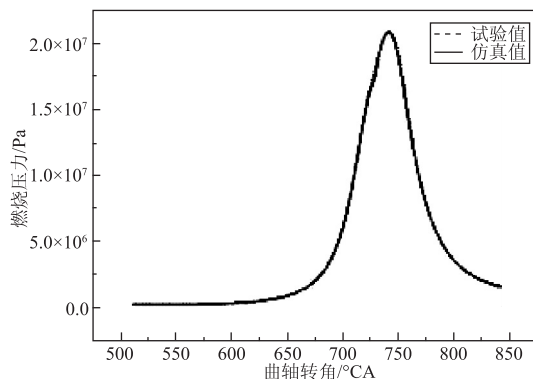


图 5 缸压曲线对比

1.5 计算方案

1.5.1 喷油器计算方案

在不改变喷油持续期, 喷油器蓄压腔内压力、喷孔背压等条件下, 采用不同的蓄压腔燃油温度对喷油嘴内部流动进行仿真分析, 喷孔几何参数为 8×0.42 , 具体方案见表 3。

表 3 孔计算方案

方案	燃油温度/K	蓄压腔压力/MPa	喷射背压/MPa
1	293	瞬态边界	16
2	303	瞬态边界	16
3	313	瞬态边界	16
4	323	瞬态边界	16
5	333	瞬态边界	16
6	343	瞬态边界	16

1.5.2 缸内燃烧计算方案

在不改变所选取的各种模型的基础之上, 采用相同的喷油持续期、喷油正时, 改变不同燃油喷射温度来分析不同燃油温度对缸内燃烧的影响。

2 喷油器计算结果分析

在喷油器计算结果分析中, 选取了针阀完全打开时刻作为分析时刻, 并从 6 个不同的燃油温度中选取了 293 K、313 K、343 K 三个温度状态做分析。由于喷油器计算时选用的模型只是压力室及以上的一小部分流场, 从各个切片可以看出, 温度对于流场的状态影响较小, 由于温度的升高, 压力也相应的升高。在喷射阶段高压燃油进入压力室, 压力室内的压力逐渐升高, 由于从喷孔入口处流通截面开始急剧收缩, 压力室与喷孔之间的区域压力变化很大, 在喷孔入口处压力急剧下降, 压力下降最剧烈的位置位于喷孔入口的上拐角处, 并出现小的负压区。这是因为液流从压力室高速流入喷孔时流动方向变化太大, 流体在压力室内壁的导向作用下高速流向喷孔的下边沿, 喷孔入口上拐角的压力很快下降到饱和蒸汽压, 在壁面附近形成负压区, 而且负压区随着针阀升程的增大而不断向喷孔出口附近发展, 见图 6、7、8(图中切片从左至右依次为 293 K、313 K、343 K)。

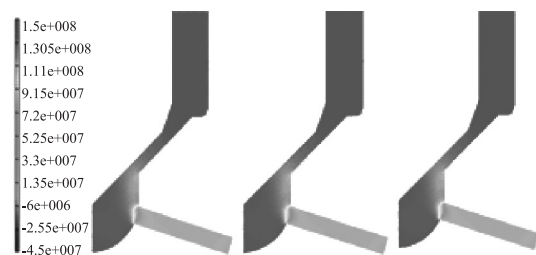


图 6 喷油器 Z 截面压力场切片图

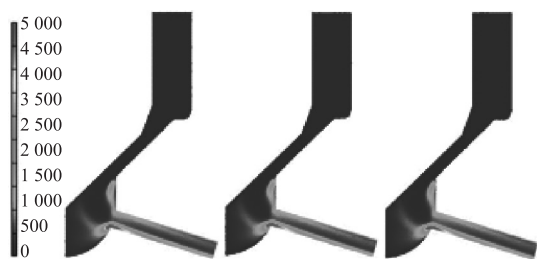


图 7 喷油器 Z 截面湍动能切片图



图 8 喷油器 Z 截面空穴分布切片图

从图 8 可以看出, 负压区在喷孔壁面形成, 并随着温度的升高, 负压区即空穴现象有增大趋势。空穴使喷孔流道内的有效流通面积减小, 液流速度分布发生重组, 流动分离, 诱发旋涡结构, 但喷孔中心的液柱具备了更大的轴向速度。所以当液柱与喷嘴近场的气相介质接触时, 气液两相间的相对速度也会增加, 这将使气动力学的作用得到加强, 利于液柱的初次破碎。从而使缸内喷射雾化更好, 从而有利于混合燃气的形成。

3 燃烧室缸内计算结果分析

缸内燃烧的切片以燃油喷雾状态为主, 对 720°、725°、730°、735°、740°这 5 个曲轴转角时刻不同燃油温度对缸内燃烧状态的影响进行分析比较。

从图 9 缸内的燃油当量比可以看出, 随着燃油温度的升高, 缸内燃油浓油区相对减小, 稀油区范围扩大, 说明燃油混合和雾化相对较好。从图 10 可以看出, 由于前期的燃油雾化较好, 从而使火焰传播速度加快, 从图 10 的 740°CA 下可以较明显地看出, 343 K 燃油温度下的火焰传播速度大于前两者。

缸内的燃烧温度也上升较快, 使缸压也成一致趋势上升。从图 11 缸内燃烧温度可以看出, 343 K 下的燃烧温度高温区要稍大于前两者。

图 9、10、11 中切片从左至右依次为 293 K、313 K、343 K 三组; 从上至下依次是 720°CA、725°CA、730°CA、735°CA、740°CA 时刻。

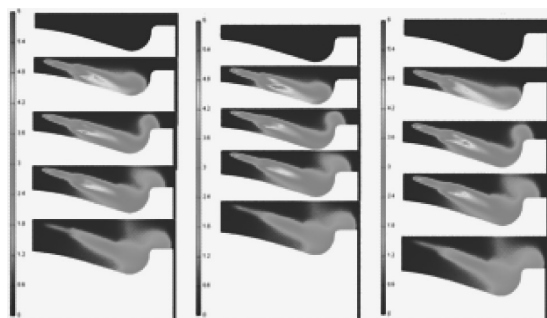


图 9 燃油当量比切片分布

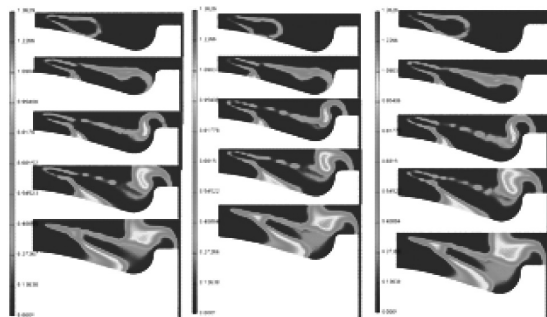


图 10 火焰传播速度切片分布

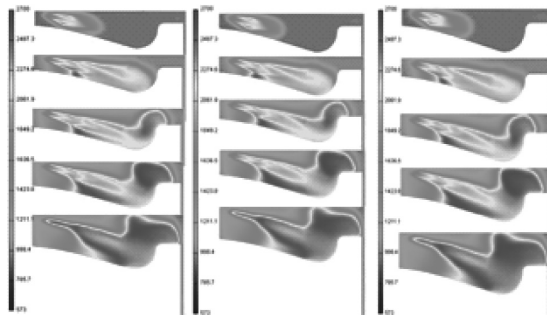


图 11 缸内燃烧温度切片分布

前面分析了燃油喷雾和缸内燃烧火焰传播, 直接导致缸内压力和温度的升高, 从图 12 和图 13 可以看出, 缸内压力和温度都随着燃油温度升高而升高, 其中各自所对应的最大压力差值有 0.3 MPa 左右, 而最高温度差值有 20 K 左右。从图中还可以观察到一个现象, 缸内压力和温度并不是随着燃油温度成线性增长的, 而是成一定的梯队, 其中 293 K 为一组, 303 K 和 313 K 为一组, 323 K 和 333 K 为一组, 最后 343 K 为一组。其中 303 K 和 313 K 的缸内压力和温度较为接近, 而 323 K 和 333 K 较为接近。

从图 14 的 NO_x 排放可以看出: 最大的 343 K 时的排放值比 293 K 时的大了近 20%, 说明燃油温度对于排放而言具有一定的影响, 这在后期的深入研究中需要扩大燃油温度范围并结合试验研究进行更加完整的分析。从 NO_x 排放的分布来看, 也可以得到和缸内压力和温度一样的梯度关系。从图 15 可以看出, soot 排放在前期和 NO_x 的排放呈相反趋势,

这是因为前期燃烧较好, 使得 soot 生成量较少, 但从后期缸内剩余的 soot 排放量看, 各个燃油温度下基本一致, 说明燃油温度对 soot 排放影响较小。

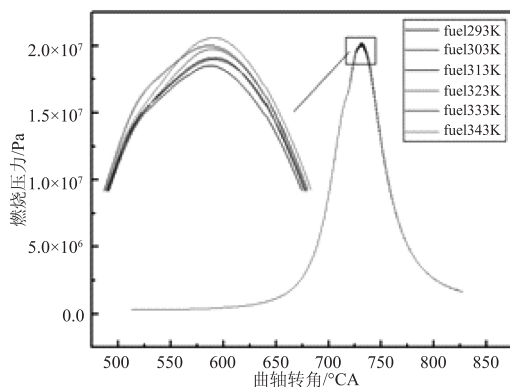


图 12 不同燃油温度下缸内压力曲线

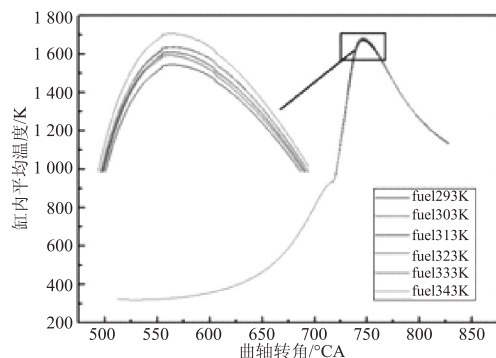


图 13 不同燃油温度下缸内温度曲线

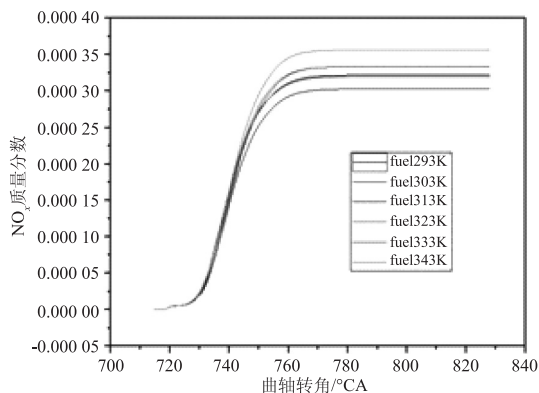


图 14 不同燃油温度下 NO_x 曲线

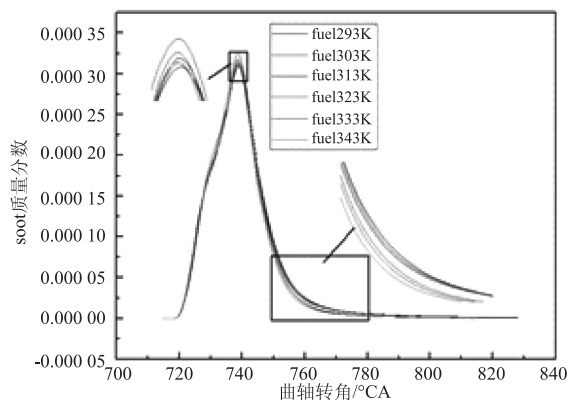


图 15 不同燃油温度下缸内 soot 曲线

4 结 论

本文利用仿真分析研究了燃油温度对喷嘴流场和缸内燃烧状态的影响。研究表明, 燃油温度对缸内燃烧和排放具有一定影响, 在一定范围内, 随着燃油温度的升高, 缸内最大燃烧压力会有所增大; 在相差 60 °C 的情况下, NO_x 排放会有 20% 的差别, 而 soot 排放成相反趋势, 最终结果相差不大。

在今后的研究中需要扩大燃油温度的控制范围, 进行宽范围的燃油温度对柴油机燃烧及排放的影响研究, 并结合试验研究, 得到合适的燃油温度值。

参考文献

- [1] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [2] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] CFD predictions of the effect of fuel temperature on heavy duty diesel engine NO_x and soot emissions [C]. SAE Paper 1999-01-0842.
- [4] Simulation and experimental studies on closed-cycle diesel engine [C]. SAE Paper 1999-01-1536.